

核电站反应堆密封环转运装置开发与应用

詹雨华 张松竹 张云朋

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12433

[摘要] 核电站大修中需将存放于木制备件盒中的新密封环转运至核岛厂房内,木盒一旦发生沾污极难处理,会直接成为固废,增加了后续人工和经济成本。由于核岛内狭小的空间场地,传统的人工抬运方式需要多人同步操作,且存在歪拉斜吊等高风险作业,安全隐患突出。基于上述条件,本文介绍了一种反应堆压力容器密封环转运工具。该工具有效提升核电站密封环转运的安全性、效率和经济性。

[关键词] 核电站; 反应堆; 密封环; 转运

中图分类号: TL48 **文献标识码:** A

Development and Application of a Transport Device for Reactor Pressure Vessel Sealing Rings in Nuclear Power Plants

Yuhua Zhan Songzhu Zhang Yunpeng Zhang

CGN Power Operation Co., Ltd.

[Abstract] During the overhaul of a nuclear power plant, it is necessary to transfer the new sealing rings stored in wooden spare parts boxes to the nuclear island building. Once the wooden boxes become contaminated, they are extremely difficult to handle and will directly become solid waste, increasing subsequent labor and economic costs. Due to the narrow space and site inside the nuclear island, traditional manual lifting methods require multiple people to operate synchronously, and there are high-risk operations such as inclined pulling and lifting, which pose significant safety hazards. Based on the above conditions, this article introduces a reactor pressure vessel sealing ring transfer tool. This tool effectively improves the safety, efficiency, and economy of sealing ring transportation in nuclear power plants.

[Key words] nuclear power plant; reactor; sealing ring; transportation

引言

在当今核电快速发展之际,核电站的安全性显得尤为重要。作为核电站一回路系统的重要组成部分,反应堆压力容器是核安全的关键屏障,其完整性和可靠性直接关系到核电站的安全运行。一个完好且严密的压力容器能够在核电站运行期间有效屏蔽放射性物质^[1]。为了保障密封,大多数核电站反应堆压力容器采用双道密封结构,配备两道金属密封环。密封元件主要分为两类:弹簧赋能型金属C型环和中空开槽型金属O型环。通常,C型环在性能和可靠性方面优于O型环,因此在国内外得到了广泛应用^[2]。杨青松等^[3]指出秦山核电站在C型环安装过程中面临的问题,强调了高环境辐射剂量和狭小操作空间带来的挑战。本研究旨在探讨密封环在转运过程中的挑战,重点关注如何提升核电站操作的安全性、效率和可靠性。

1 行业现状分析

作为核电站的核心设备,反应堆压力容器承担着容纳堆芯、测量仪表等关键部件的重要功能,是核电站一回路系统的关键

安全屏障。其密封性能直接关系到核电站的安全运行,一旦发生泄漏,将对核电站的安全性和环境造成严重威胁。

反应堆压力容器的密封面属于一回路压力边界,密封性能要求极高。密封环作为保障反应堆压力容器密封性能的核心元件,在核电站机组大修期间,需定期更换1套或2套密封环(十年大修)。密封环的转运过程涉及从备件库到核岛龙门架20米标高平台存放,再到反应堆压力容器顶盖储存间屏蔽体支座上的O环储存盒存放。然而,目前密封环的转运主要依赖木质O环盒。由于木质盒子在核岛内使用时存在诸多问题,如木质盒子出现沾污不宜处理,转运过程中需要多人配合易出现人因失效等。

针对上述问题,本文开发了一种新型的反应堆压力容器密封环转运工具。该工具通过自动化设计,降低人力资源消耗,减少了人因失效风险,同时避免了不规范操作对密封环和设备的潜在损伤,为核电站的安全、高效运行提供了有力保障。

2 总体设计方案

根据目前核电站的实际需求,本研究旨在开发一种新型的

压力容器密封环转运工具,并在现场实际应用中验证其有效性。该工具采用金属材料作为主体结构,既能保证设备的刚性,又在沾污情况下便于放射性去污处理。工具上增加的有机玻璃可视窗,可使操作人员可以随时观察密封环在装置中的位置与状态。设备本体为可拆卸结构,同时配备专门的存放箱,方便运输与存放,无需额外包裹。工具的上盖和底盖均可打开,可有效避免因密封环材料较软而从上方取出可能导致的损坏。通过均匀布置的柔软挂件将密封环托举存放,拆卸简便,有效保证密封环在装卸和运输过程中的完整性,并可同时存放两套密封环。为提升操作效率和安全性,工具加入气动装置,单人即可实现多个托兜的同步上升和下降,减少人员需求。连接方式采用快插接头,进一步提高工作效率。工具设置了专用圆形吊盘,避免传统三点吊装可能导致的歪拉斜吊问题,提升安全性。

3 详细设计

3.1 转运工具总体设计

反应堆压力容器密封环转运工具集吊装,运输,装卸于一身。该工具的结构包括设备本体、气动模块、吊装模块、升降机构、防下滑限位模块组成。

该设备允许一人操作完成密封环的装卸操作,降低了现场工作安全风险,提高了工作效率,该设备适用于国内外所有核电站机组。

3.2 设备本体设计

设备本体采用模块化设计,如图1所示。主支架作为核心承载部件,其“工字形”截面设计不仅优化了整体结构的力学性能,还为内部密封环提供了多重保护与稳定支撑,确保转运过程中的安全性。每段主支架的弧形分体表面均标有阿拉伯数字编号,确保安装时能够使用搭扣按照顺序连接,避免因错位或误装导致的结构不稳定或功能失效。底盖上设计的透明视窗采用有机玻璃材料制成,能够在不拆卸装置的情况下实时观察内部密封环的位置及状态,极大提升了设备的可视化和操作便捷性。

上盖和底盖的数量均设置为12个,通过搭扣拼装方式,操作人员可以快速完成主体框架的组装与拆卸。搭扣连接方式不仅简化了安装流程,还进一步提升了转运工具的实用性和效率。

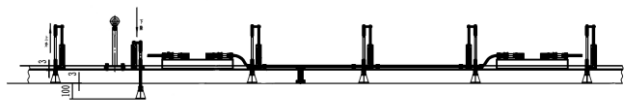


图1 设备本体

3.3 气动装置设计

该装置的每段本体均配备独立的气管,气管之间通过高可靠性的快插接头连接。快插接头在高频率的安装与拆卸操作中能够保持长期稳定的气密性,这种设计不仅简化了气管的连接流程,还显著提升了装置的组装效率。

为了进一步优化安全性和便捷性,控制手柄采用独立存放设计。手柄与装置主体分离,避免了在搬运过程中因误碰或震动导致的损坏或意外操作。在使用时,操作人员需将手柄连接至手

动换向阀。

在试验开始前,需连接外部气泵对装置本体进行充气操作。充气完成后,操作人员可通过顺时针旋转手柄实现装置的下降操作,逆时针旋转手柄则实现上升操作。若装置未能按预期实现功能,需立即停止操作并进行系统检查,重点排查气动模块的工作状态。为辅助故障诊断和监控操作,装置配备了压力表,实时监测气动系统的压力变化,准确反映系统内部的压力值,进而做出及时的故障判断。

3.4 吊装系统设计

为确保吊装过程的安全性,该装置特别设计了专用的吊装系统。吊装系统的核心部件为吊盘,吊盘采用高强度合金钢锻造而成,具备优异的抗拉强度和抗疲劳性能。吊盘上方设有吊耳,能够与各类吊装设备连接,确保吊装过程中的稳定性和可靠性。

吊盘下方均匀分布六个专用卸扣连接吊带,能够承受高强度的动态载荷。吊带与装置主体上方的六个吊柱连接。吊柱与主体结构紧密固定,确保吊装过程中力的均匀分布。

吊装系统的设计有效避免了因歪拉斜吊导致的设备倾斜或失衡风险,还增强了操作过程中的控制性和安全性,即使在复杂或狭小的作业环境中,该吊装系统也能确保装置平稳、安全地移动和定位。

3.5 升降机构设计

该装置的18个托兜采用新型塑胶材料制成,具有优异的柔软性、耐磨性和抗老化性能。这种材料可以最大限度地避免密封环因摩擦或挤压导致的损坏。托兜内部设计了两条定位槽,分别用于固定内密封环和外密封环,在安装和拆卸过程中不会发生移位或脱落。托兜的安装与拆卸操作极为简便,只需将其挂载或从挂块上取下即可完成。

目前的升降机构采用气动驱动系统,如图2所示。通过气缸与升降杆之间的机械连接,利用压缩空气的推动与排放来实现升降杆的垂直运动。具体而言,气缸的活塞杆与升降杆直接或间接连接,气源通过气管将压缩空气输送至气缸内,通过控制阀调节气流的进出方向,从而控制气缸活塞的往复运动。当压缩空气进入气缸的下腔时,活塞杆向上运动,带动升降杆上升,进而带动托兜整体提升反之托兜集体下降。

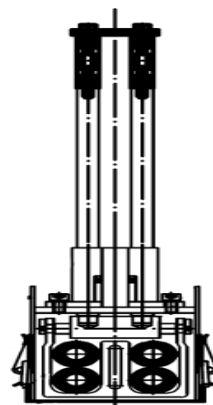


图2 升降机构

4 现场应用情况

4.1 使用前检查

在使用本装置前,应进行以下目视检查,确保设备处于良好状态:

检查螺栓等紧固件:确认所有紧固件是否松动,确保连接部位牢固可靠。

检查接头密封性:确认气管接头是否密封可靠,避免因泄漏导致装置功能异常。

检查托兜完整性:观察托兜是否存在缺损或变形等,确保其能够稳定承载密封环。

检查结合面润滑情况:检查结合面润滑脂是否干涸或锈蚀,确保运动部件运行顺畅。

若在检查中发现托兜或升降杆等设备存在破损、卡涩等上述问题,应及时更换相关部件,并使用N5000润滑脂进行润滑,以确保设备正常运行。

4.2 使用步骤

检查完毕后在新密封环转运前进行如下操作:

(1)使用前将各段设备本体取出并按照标号进行组装,在设备上方均有阿拉伯数字进行标识,6段弧形分体组成完毕后形成一个整体圆环。组装的方式为各使用M10内六角螺钉进行连接,每段的气管使用快插接头进行连接。(2)将六个卸扣安装在专用的吊盘上,并安装六根相同的吊带,吊带下方连接六根吊柱,都安装好后将设备吊起约一米高度。(3)在设备使用前先安装手柄,将手柄旋入阀体,按照指示将手柄拨到相应的中间位置,连接本体进气口和出气口与气泵的快插接头,进行充气操作。(4)将18个托兜放在密封环下方按照圆周均匀摆放,起吊设备放在密封环上部,打开底盖并使升降杆放在最底部,将托兜分别挂在挂块上。(5)一个人扶设备,另一个人拨动手柄提升托兜,同时观察视窗确定密封环是否完全进入到设备本体内,完毕后按照阿拉伯数字编号依次将上盖和底盖通过搭扣安装好。(6)将限位杆往上翻转至限位弹片卡住升降导杆,托兜挂载的密封环相对设备静止,可由核岛外围转运到核岛。(7)密封环转运至核岛后,吊装至压力容器顶盖存放间,并移动到核岛存放槽的正上方后放下吊车拆卸,在核岛拆卸密封环按照第六步到第四步反向操作即可。(8)该设备体积较大,在不使用时拆卸后用专用的箱子进行储存。

4.3 应用与效果

4.3.1 实际应用

转运装置在某核电站机组大修期间成功投入使用,圆满完成了密封环的转运任务。与传统的木质盒转运方式相比,该装置在安全性、效率与经济性、环保性等方面表现显著:

安全性:转运过程中未发生人员受伤,密封环未受到任何损伤,同时有效避免了传统操作中存在的歪拉斜吊等起重安全风险。

效率与经济性:转运装置的操作人力从原来的9人减少至仅需2人,转运时间缩短约60%,大幅提升了工作效率,降低了人力成本。

环保性:通过替代木质盒的使用,显著减少了核岛内放射性固废的产生量,进一步提升了核电站的环保水平。

4.3.2 效果分析

转运装置的应用不仅显著提升了转运过程的安全性和效率,还大幅降低了人力资源的投入和转运时间,同时减少了核岛放射性固废的产生量。这些改进为核电站的安全、高效运行提供了有力保障,具有重要的工程应用价值。

5 结论

本文针对核电站反应堆密封环转运过程中的问题,开发了一种新型的转运装置。该装置通过自动化设计,显著降低了转运过程中对人员的依赖,减少了人因失效风险,同时避免了不规范操作对密封环和设备的潜在损伤。此外,该工具还能够提升转运效率,降低人力资源消耗,减少核岛放射性固废量,为核电站的安全、高效运行提供了有力保障。这一创新工具的应用,不仅填补了核电站密封环转运领域的技术空白,也为核电行业的智能化和自动化发展提供了重要参考。

[参考文献]

[1]肖守勇.压水堆核电站压力容器密封环原理及监测[J].企业技术开发,2017,36(08):49-51.

[2]荣钢,张维.反应堆压力容器用C形密封环的选型设计研究[J].中国设备工程,2023,(19):83-86.

[3]杨青松,郝中航,唐超.压水堆核电厂压力容器C型密封环安装专用工具设计和研发[J].核动力工程,2014,35(S1):186-188.

作者简介:

詹雨华(1988--),男,汉族,江西省新余市人,本科,工程师,研究方向:机械。